

논문 2014-51-3-2

마코프 모델을 이용한 원전 비상 통신 시스템 성능 분석

(Performance Analysis of Emergency Communication System of Nuclear Power Plant using Markov Model)

손 광 섭*

(Kwang Seop Son[©])

요 약

후쿠시마 원전사고는 자연재해에 의한 중대사고 발생 시 전원공급 중단 및 극한 환경으로 인해 발전소 내부 상황을 정확하게 파악하지 못하였고, 대부분의 계측제어시스템이 그 기능을 제대로 발휘하지 못해 비상냉각기능이 상실되어 수소폭발 및 다량의 방사능이 누출된 사고였다. 본 논문에서는 중대사고 발생 시에도 발전소 내부 상황을 감시하고, 적절히 제어할 수 있는 비상대응시스템에 대하여 소개하고, 비상대응시스템에 사용되는 무선통신망의 성능요구사항에 대해서 논의하고, 요구사항을 만족시킬 수 있는 비상통신망의 성능을 마코프 모델을 이용하여 분석하였다.

Abstract

In Fukushima accident, when the severe accident such as a natural disaster happens, it is impossible to monitor the plant status due to a extreme environment and station blackout and most I&C systems break downs. Finally, these cause the loss of emergency cooling function and thus results in a hydrogen explosion and radiation leak. In this paper, the emergency response system is introduced that monitors and controls properly when the sever accidents like Fukushima accident happen, And the performance requirements of a wireless communication system used in the emergency respons system is described and the performance of emergency communication system is analyzed using the markov model

Keywords : Emergency communication system, performance, markov model

I. 서 론

최근 일본 후쿠시마현의 대지진과 대형 지진해일로 인해 후쿠시마 원전 내 모든 전원이 상실되는 전원상실 사고(Station Black Out)가 발생하였고, 이로 인해 원전의 비상냉각기능이 상실되어 원자로 및 사용후 핵연료 저장수조의 냉각기능이 저하되어 수소폭발 및 다량의 방사능이 누출되었다^[1~4].

후쿠시마 사고가 조기에 수습되지 못한 이유의 중의 하나는 원자력발전소 내부 상황을 정확하게 파악하지

못한 것으로, 대부분의 계측제어기가 전원상실 및 사고로 인한 손상으로 그 기능을 제대로 발휘하지 못했다. 또한 비상대응 및 방사선 비상대책을 총괄하기 위한 비상대응시설(Emergency Response Facility)이 원자력 발전소 외부에 설치되어 있지만^[5], 발전소 사고에 따른 감시정보가 제한되어 있고, 방사는 누출로 30km 이상 넓은 지역으로 소개되어 이 시설을 활용할 수 없었다. 따라서 이와 같은 취약성을 극복하기 위해서는 그림 1과 같이 극한환경 하에서도 작동하여 발전소 내부 상태 감시에 필요한 계측신호를 수집하고, 사고복구에 필요한 펌프나 밸브와 같은 비상기기를 제어할 수 있는 극한환경용 제어기와 최소 30km 떨어진 발전소 외부에서 내부 사고 상황을 감시하고 사고 복구를 위한 제어를 수행할 수 있는 모바일 원격 제어실과 두 시스

* 정회원, 한국원자력연구원
(Korea Atomic Energy Research Institute)

© Corresponding Author(E-mail: ksson78@kaeri.re.kr)
접수일자: 2014년2월7일, 수정완료일: 2014년3월4일

템을 연결할 수 있는 무선통신시스템이 필요하다.

본 논문에서는 극한환경제어기기와 원격제어실을 연결하는 원전비상통신시스템에 대한 성능 요건을 설정하고, 설정된 성능요건을 만족시킬 수 있는 통신방식을 선정하였다. 또한 수학적 모델을 이용하여 선정된 통신 방식에 대한 성능 분석을 통하여 성능 요건 만족 여부를 평가하였다.

II. 본 론

본 장에서는 원전비상통신시스템을 구성하기 위해서 요구되는 네트워크 구성, 전송지연시간 및 유효전송용량, 비트 에러율과 같은 성능 요구사항에 대하여 분석하고, 분석된 성능 요구사항을 만족시킬 수 있는 통신 파라미터들에 대하여 논의하고자 한다.

1. 원전비상통신시스템 성능요구사항

가. 네트워크 구성

후쿠시마 사고 이전에는 원자력 발전소 설계 시, 발전소 한 호기의 사고에 대해서만 고려했지만, 후쿠시마 사고 이후에는 다수 호기가 동시에 사고가 나는 상황을 고려해야 한다. 우리나라의 경우, 제6차 전력수급기본계획^[6]에 따르면 고리지역에 총 12개의 원자력발전소가 설치 운영된다. 따라서 12호기가 중대사고로 인해 동시에 고장이 발생한다면, 원격 모바일 제어실에서는 12호기 발전소에 대한 상태 감시 및 제어가 이루어져야 한다. 따라서 1:12 통신방식이 필요하다.

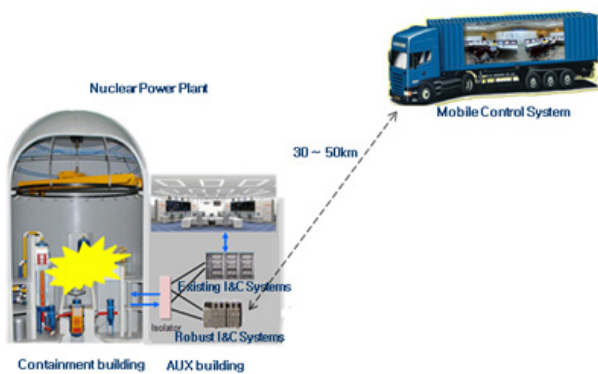


그림 1. 원전비상대응시스템 구성
Fig. 1. Configuration of Emergency Response system.

표 1. 발전소 감시 및 제어변수
Table 1. Monitoring and Control Parameters.

계통	구분 (계측/제어)	신호종류	명칭	수량
CTMT	계측	A	CTMT Humidity	1
	계측	A	CTMT Pressure	1
	계측	A	CTMT Radiation	1
	계측	A	CTMT Temperature	1
	계측	A	H ₂ Concentration	1
	계측	A	CTMT Sump Level	1
CCWS	계측	A	CCWS Temperature	1
	제어	D	CCW Pump	1
SIS	계측	A	Accumulator Pressure	1
RCS	계측	A	Core Outlet Temperature	1
	계측	A	Reactor Vessel Water Level	1
	계측	A	Sub-cooled Temperature Margin	1
	계측	A	PZR Pressure(Wide/Narrow)	2
	계측	A	PZR Level(Wide/Narrow)	2
	계측	A	PZR Pressure Relief Tank Pressure/Temperature	2
	계측	A	Hotleg 1~3 Temperature	3
	계측	A	Coldleg 1~3 Temperature	3
	계측	A	Temperature Average 1~3	3
	계측	A	Delta Temperature 1~3	3
	계측	A	RCS Flow 1~3	3
	계측	A	PZR Spray Flow	1
	계측	D	RCP 1~3 Status	3
	MSSS	계측	A	SG 1~3 Pressure
계측		A	Steam Flow 1~3	3
계측		D	SG PORV 1~3 Position	3
계측		D	SG PSV 1~3 Position	3
FWS	계측	A	SG 1~3 Level (Wide/Narrow)	6
	계측		Feed Flow 1~3	3
RHRS	계측	A	Return Temperature/Flow	2
	계측	A	RWST Level	1
	계측	A	RHR Hx Bypass Flow	1
	계측	A	RHR Hx Discharge Flow	1
	제어	D	Valves	10
	제어	D	CTMT Spray Pump	1
	제어	D	RHR Pump	1
	제어	D	Charging Pump #1~#3	3
CVCS	계측	A	RHX Outlet Temperature	1
	계측	A	Boron Concentration	1
	계측	A	Charging Outlet Temperature	1
	계측	A	Charging Flow	1
	계측	A	Makeup Water Tank Discharging Flow	1
	계측	A	Batch Flow	1
	계측	A	Letdown Hx Outlet Flow/Temperature/Pressure	3
	계측	A	VCT Pressure/Level	2
	제어	D	Valves	20
	제어	D	Makeup Pump #1~#2	2

나. 유효전송용량 및 전송지연시간

중대사고 발생 시, 사고회복을 위해 반드시 감시 및 제어해야 할 발전소 내부 상태 변수는 표 1과 같다^[7].

- * A : Analog / D : Digital
- * CCWS : Component Cooling Water System
- * CTMT : Containment
- * CVCS : Chemical Volume Control System
- * FWS : Feed Water System
- * Hx : Heat Exchanger
- * MSSS : Main Steam Supply System
- * PORV : Pilot Operated Relief Valve
- * PSV : Pressurizer Safety Valve
- * PZR : Pressurizer
- * RCP : Reactor Coolant Pump
- * RCS : Reactor Coolant System
- * RHR : Residual Heat Removal System
- * RHX : RHR Heat exchanger

표 1과 같이, 각 발전소 내부 상태 변수 및 제어신호는 총 111개로 대부분이 아날로그 신호이다. 원자력 발전소의 안전과 관련된 센서 및 설비들은 다중화로 설계되며, 일반적으로 4 채널로 설계된다^[8]. 따라서 내부 상태변수 및 제어신호 종류는 111개이지만, 필요 데이터량을 산출하기 위해서는 4 채널을 고려해야 한다. A/D(Analog to Digital) 컨버터의 분해능이 16bit라 가정하고, 여유도를 고려하면 상태신호의 경우 610Byte, 제어신호의 경우 150Byte가 요구된다. 또한 각 센서들이 100ms의 샘플주기로 발전소 상태를 측정하고, 패킷

의 오버헤드와 12개의 발전소를 고려하면 극한환경제어 기기에서 모바일 원격 제어실로의 전송은 대략 0.7Mbps, 모바일 원격 제어실에서 극한환경제어기기로의 전송은 대략 0.3Mbps의 전송용량이 요구된다.

발전소 비상상황 발생 시 운영되는 비상대응설비(ERF, Emergency Response Facility)의 데이터베이스의 데이터 갱신 주기는 0.1 ~ 1 초 사이이므로, 모바일 원격 제어실도 이와 동일하게 적용하였다.

다. 비트 오류율(BER, Bit Error Rate)

비트 오류율은 변조기법, 채널코딩, 실효 등방성 복사 전력(EIRP, Effective Isotropically Radiated Power), 수신단의 안테나 이득, 수신단의 민감도(Sensitivity)의 함수로, 일반적으로 무선 환경에서 비트 오류율은 10^{-3} ~ 10^{-6} 에 존재한다^[9,10]. IEEE 802.15.4 기술표준의 경우, 20 바이트의 데이터 전송 시, 1% 패킷 오류율(PER, Packet Error Rate)을 요구하고^[11], IEEE 802.11b의 경우는 400 바이트의 데이터 전송 시 3%의 프레임 오류율(FER, Frame Error Rate)을 요구한다^[12]. 이를 비트 오류율로 환산하면 각각 6.2×10^{-5} , 9.5×10^{-6} 이다. 원전 비상통신시스템의 비트 오류율도 참고 자료 및 기술 표준을 고려하여 10^{-6} 이하를 요구하도록 설정하였다.

2. 원전비상통신시스템 통신방식

표 2는 통신거리에 따른 무선통신 기술을 요약한 것으로, 원전비상통신시스템의 경우 앞 장에서 분석할 결

표 2. 거리에 따른 무선망 표준 비교

Table 2. Wireless Standard Comparison.

구분	무선 WAN		무선 MAN	무선 LAN	무선 PAN		
	2.5G	3G	-WiMax -MBWA	WiFi	Blue tooth	UWB	Zigbee
기술 및 표준	GPRS cdma 1x	cdma EV WCDMA	802.16e 802.20	802.11 (a,b,g,n)	802.15.1	802.15.3	802.15.4
주파수 대역	800MHz 1.7~1.8 GHz	2GHz (국내)	2.5GHz (국내) 2~66GHz	2.4GHz 5GHz	2.4GHz	5.1~ 10.6GHz	2.4GHz
전송 속도	144Kbps	554kbps~ 2Mbps	134Mbps	11Mbps(a), 54Mbps(b,g) 248Mbps(n)	1~ 10Mbps	100~ 500Mbps	20~ 250kbps
전송 거리	15km 내외	15km 내외	~50km	50~100m	10m	20m	10~ 100m
네트워크 구성	점대다점	점대다점	점대다점	점대다점	Adhoc	점대점	Adhoc star mesh

과와 통신거리 30km를 고려하면, WWAN(Wireless Wide Area Network)과 WMAN(Wireless Metropolitan Area Network) 방식을 이용해야 하지만, 통신 사업자를 배제하고, 사설망으로 쉽게 이용할 수 있는 WLAN(Wireless Local Area Network) 방식을 선정하였다.

3. 원전비상통신시스템 성능분석

가. 통신 링크 버짓(Link Budget) 및 비트 오류율 분석

ISM(Industrial, Science, Medical) 대역을 사용하는 무선통신시스템의 최대 출력은 10mW/MHz, 안테나 이득은 점대점 통신일 경우 20dBi, 점대다 통신은 6dBi로 제한되어 있다^[13]. 원전비상통신시스템의 통신 링크 및 비트 오류율을 분석하기 위해서 출력은 23dBm, 12개의 발전소로부터 데이터를 수신하는 모바일 원격 제어실은 6dBi의 전방향성 안테나를 사용하고, 12개의 발전소는 20dBi의 지향성 안테나를 사용한다고 가정하고, 수신단의 민감도(Sensitivity)는 -86dB^[14~17]이고, 잡음지수[NF, Noise Figure]는 6dB라 가정하였다^[17~19].

표 3은 원전비상통신시스템의 링크버짓을 분석한 것으로, 분석 결과 Fade Margin은 3dB이다.

원전비상통신시스템의 요구 데이터량은 약 1Mbps이므로 채널 데이터 변조방식은 BPSK(Binary Phase Shift Keying)가 사용된다. 그림 3은 BPSK 변조 방식을 사용하는 E_b/N_0 (Energy per bit/Noise power spectral density)에 따른 BER을 나타내는 그래프로, 잡음 모델은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)이라 가정하였다.

S/N (Signal to Noise Ratio)과 E_b/N_0 과의 관계는 다음과 같다^[20].

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \left(\frac{W}{R} \right) \quad (1)$$

S : 수신된 전력
 N : 잡음전력
 R : 데이터 전송률
 W : 대역폭

원전비상통신시스템의 BER 요건은 10^{-6} 이하이므로, 그림 2에서와 같이 E_b/N_0 은 약 10dB 이상 되어야 한다. 표 3에서와 같이 비상통신시스템의 대역폭이 20MHz, 채널 데이터 전송률이 6Mbps라 한다면 식(1)

표 3. 원전비상통신시스템의 링크버짓 분석결과
Table 3. Analyzed Communication Link Budget.

파라미터	단위	값
동작주파수	GHz	2.4
동작범위	km	4
대역폭	MHz	20
송신부		
송신출력	W	0.2
	dBm	23
안테나 이득	dBi	20
케이블 손실	dB	-1
실효등방성복사전력	dBm	42
경로손실		
자유공간	dB	-129.6
편파손실	dB	-0.5
총 경로손실	dB	-130.1
수신부		
안테나 이득	dBi	6
잡음지수	dB	6
케이블 손실	dB	1
수신 민감도 (@6Mbps)	dBm	-86
잡음층(Noise Floor)	dB	-101
Fade Margin	dB	3

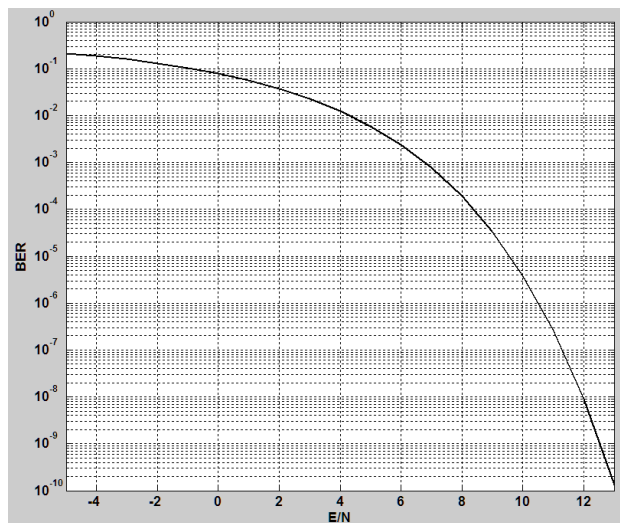


그림 2. BPSK의 E_b/N_0 에 따른 BER
Fig. 2. BER of BPSK depending on E_b/N_0 .

에 의해 요구되는 S/N 은 약 4.8dB 이상 요구된다.

표 3에서 보는 바와 같이 잡음층의 전력이 -101dB 이므로 수신된 신호의 세기는 -96.2dB 이상 되어야 한다. 표 3과 같은 조건일 때, 수신된 신호의 세기는 -89.1dB이므로 약 7dB 정도의 여유가 있다.

나. Throughput 분석

원전비상통신시스템의 Throughput을 분석하기 위하여 IEEE 802.11 DCF(Distributed Coordination Function)를 마코프 모델링 하였다.

802.11에서 매체에 접근하는 방식은 Basic과 RTS(Request to Send)/CTS(Clear to Send)가 있다.

Basic 매체접근 방식은 2-way 핸드셰이킹 방식으로 그림 3과 같이 스테이션 A는 backoff 과정이 끝난 후 DIFS(DCF Interframe Space)동안 채널이 아이들 상태가 될 때까지 기다린 후 데이터를 전송한다. 스테이션 A가 데이터를 전송하는 동안 채널은 무휴(Busy)상태가 되고, 스테이션 B는 ACK를 수신 스테이션으로 수신 후 DIFS동안 채널이 아이들 상태가 될 때까지 기다린 후 backoff 과정으로 들어간다. backoff 과정에서 스테이션 A에 의해서 채널이 무휴상태임을 감지하면 backoff 슬롯 값을 감소시키지 않고 채널이 아이들 상태가 될 때까지 기다린다. 다시 채널이 아이들 상태가 되면 DIFS동안 기다린 후 다시 backoff 슬롯을 감소시킨다^[21].

RTS/CTS를 이용하여 매체에 접속하는 방법은 그림 4와 같다. 기본 매체접속 방법과는 달리 RTS/CTS 프레임의 이용하여 채널을 미리 예약한다. 따라서 기본 매체접속방법보다는 충돌 확률이 낮다.

IEEE 802.11의 분석 모델에 대하여 여러 연구가 진

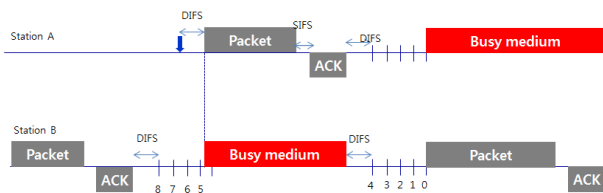


그림 3. DCF의 Basic 매체접속 방법
Fig. 3. Basic Media Access Method of DCF.

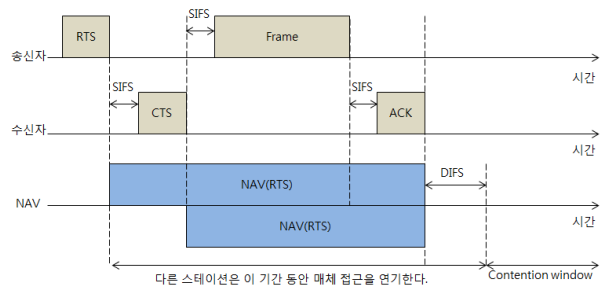


그림 4. DCF의 RTS/CTS 매체접속 방법
Fig. 4. DCF RTS/CTS Media Access Method of DCF.

행되어 왔었다^[22~25]. 참고 문헌[22]에서는 단순 공간 모델을 이용하여 프로토콜의 특성을 분석하였고, 참고문헌[23~25]는 마코프 모델을 이용하여 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)의 포화(saturation) throughput을 분석하였다. 그러나 이 모델에서는 채널이 무휴(busy) 상태일 경우 backoff 타임 카운터(backoff time counter)가 멈추는 상태를 고려하지 않았다. 본 논문에서는 채널의 무휴 상태를 고려한 CSMA/CA의 마코프 모델을 이용하여 Throughput 과 지연시간을 분석하였다.

IEEE 802.11 DCF의 마코프 모델링을 위하여 다음과 같은 사항을 가정하였다.

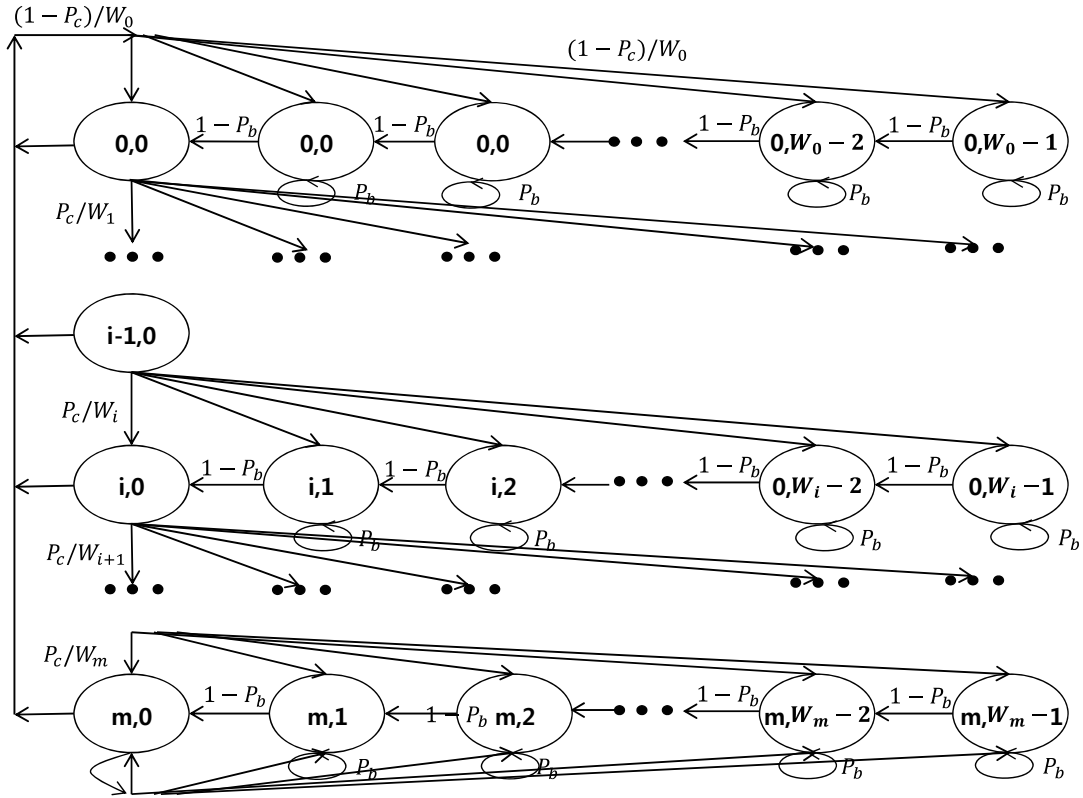
- 채널 잡음에 의한 프레임 오류는 무시
- 숨겨진(hidden) 스테이션은 존재하지 않음
- 모든 스테이션은 항상 전송할 패킷을 갖고 있음(포화 조건)
- 각 패킷은 상수이고, 독립적인 확률 P_c 의 확률로 서로 충돌
- 마지막 backoff 단계로 진입하는 횟수는 제한없음 (즉, 여러번 충돌이 발생해도 패킷을 버리지 않음)

숨겨진 스테이션이 존재하지 않는다고 가정한 이유는 II장에서 분석한 바와 같이 12개의 발전소와 30km 떨어진 모바일 원격 제어실과 통신을 하기 위해서는 충분한 송신전력과 지향성의 고 이득 안테나를 사용한다고 가정했기 때문에 숨겨진 스테이션은 존재하지 않는다고 가정하였다.

슬롯타임 t 에서 스테이션의 backoff time counter를 나타내는 확률과정(stochastic process)를 $b(t)$ 라 하고 각 station의 backoff counter는 각 슬롯타임 초반에 하나씩 감소한다. 만약 각 스테이션이 P_b 의 확률로 채널이 무휴 상태를 감지하면, 채널이 유히(idle) 상태가 될 때까지 backoff time counter는 감소하지 않고 정지 상태가 된다.

특정시간 t 에서 스테이션의 backoff 단계를 나타내는 확률과정을 $s(t)$ 라 가정하고, 각 패킷이 P_c 의 확률로 서로 충돌하게 되면 backoff 단계는 2배가 된다.

2차원 확률과정인 $\{b(t), s(t)\}$ 는 이산시간 마코프 체인으로, 그림 5와 같다. 그림 5의 상태전이 확률(State Transition probability)은 다음과 같다.



W_i : backoff 단계 i 의 경쟁 윈도우 (contention window)의 크기
 m : 최대 backoff 단계

그림 5. 802.11 DCF의 마코프 모델
Fig. 5. Markov Model of 802.11 DCF.

- 스테이션은 채널이 유희상태임을 감지하면 backoff time counter를 감소시킨다.

$$P(i, k|i, k+1) = 1 - P_b, k \in (0, W_i - 1), i \in (0, m) \quad (2)$$

- 스테이션은 채널이 무휴상태임을 감지하면 backoff time counter는 중지되어 현 상태를 유지한다.

$$P(i, k|i, k) = P_b, k \in (0, W_i - 1), i \in (0, m) \quad (3)$$

- 패킷이 충돌되면, 스테이션은 다음단계의 backoff time counter를 선택한다.

$$P(i, k|i-1, 0) = \frac{P_c}{W_i}, k \in (0, W_i - 1), i \in (1, m) \quad (4)$$

- 패킷이 성공적으로 전송되면, 이후의 새로운 패킷

은 backoff 단계 0에서 시작된다.

$$P(0, k|0, 0) = \frac{1 - P_c}{W_0}, k \in (0, W_0 - 1), i \in (0, m) \quad (5)$$

- backoff 단계, m 에서 패킷이 충돌되면 backoff 단계는 다시 m 단계로 진입한다.

$$P(m, k|m, 0) = \frac{P_c}{W_m}, k \in (0, W_m - 1) \quad (6)$$

$b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}$ 를 마코프 체인의 정상분포(stationary distribution)라 하고, i, k 는 정수로 $0 \leq i \leq m, 0 \leq k \leq W_i - 1$ 범위에 존재한다. 확률 $b_{i,k}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$b_{i,0} = P_c b_{i-1,0} = (P_c)^i b_{0,0}, 0 \leq i < m \quad (7)$$

$$b_{m,0} = P_c(b_{m-1,0} + b_{m,0}), i = m \quad (8)$$

식 (7)과 (8)를 이용하면 $b_{i,k}$ 를 $b_{i,0}$ 로 다음과 같이 표현된다.

$$b_{i,k} = \left(\frac{W_i - k}{W_i} \right) \left(\frac{1}{1 - P_b} \right) b_{i,0}, \quad (9)$$

$$0 \leq i \leq m, 0 \leq k \leq W_i$$

모든 상태의 확률은 1이므로

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} \left(\frac{W_i - k}{W_i} \right) \left(\frac{1}{1 - P_b} \right) b_{i,0} \quad (10)$$

식 (7) ~ (10)을 이용하면 $b_{0,0}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$b_{0,0} = \frac{2(1 - P_b)(1 - 2P_c)(1 - P_c)}{W(1 - (2P_c)^m)(1 - P_c) + (1 - 2P_c)(W(2P_c)^m + 1)} \quad (11)$$

τ 를 랜덤하게 선택된 슬롯 타임 내 패킷을 전송할 확률이라고 한다면 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = \frac{\sum_{i=0}^m b_{i,0}}{1 - P_c} = \frac{b_{0,0}}{1 - P_c} = \frac{2(1 - P_b)(1 - 2P_c)}{W(1 - (2P_c)^m)(1 - P_c) + (1 - 2P_c)(W(2P_c)^m + 1)} \quad (12)$$

W : 초기 경쟁 윈도우 크기

수식 (12)에서 P_b 는 채널이 무효상태일 때 패킷을 전송할 확률로, 주어진 슬롯타임 내에서 적어도 하나의 스테이션이 패킷을 전송할 확률과 동일하다. 따라서 P_b 는 다음과 같이 표현된다.

$$P_b = 1 - (1 - \tau)^n \quad (13)$$

n : 스테이션의 총 개수

P_c 는 슬롯타임 내에서 두 개 혹은 더 많은 스테이션들이 프레임 전송할 때 충돌되는 확률로 다음과 같이 표현된다.

$$P_c = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (14)$$

파라미터 m, W, n 을 알고 있다면 식 (12)~(14)을 이용하여 P_b, P_c 를 구할 수 있다.

정규화된(Normalized) Throughput T_N 은 다음과 같이 표현된다.

$$T_N = \frac{E[\text{슬롯타임 내 전송된 패킷량}]}{E[\text{슬롯타임의 길이}]} \quad (15)$$

$E[X]$: 랜덤 변수 X 의 평균

슬롯타임 내에서 적어도 하나의 패킷을 전송할 확률을 P_{tr} 이라고 한다면 P_{tr} 은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (16)$$

채널 내에서 패킷이 충돌없이 성공적으로 전송할 확률을 P_s 라고 한다면

$$P_s = \frac{n\tau(1 - \tau)^n}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1 - \tau)^n}{1 - (1 - \tau)^n} \quad (17)$$

채널 내에서 오류가 발생되지 않는다고 가정하면 T_N 은 다음과 같이 표현된다.

$$T_N = \frac{P_s E[P]}{\left(\frac{1}{P_{tr}} - 1 \right) \sigma + P_s T_s + (1 - P_s) T_c} \quad (18)$$

P = 패킷 크기
 σ = 슬롯타임 길이

식 (15)에서 $E[\text{슬롯타임 내 전송된 패킷량}]$ 은 P_s 와 평균 패킷 크기인 $E[P]$ 의 곱으로 표현되고, $E[\text{슬롯타임의 길이}]$ 는 평균 유휴 시간, 평균 충돌 시간, 성공적인 평균 전송 시간의 합으로 표현된다. 유휴 시간은 모든 스테이션이 패킷을 전송하지 않는 시간으로 평균 유휴 시간, $E[Idle_{time}]$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$E[Idle_{time}] = [(1 - P_{tr}) + (1 - P_{tr})^2 + \dots] \sigma = \left[\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n (1 - P_{tr})^k \right] \sigma = \left(\frac{1 - P_{tr}}{P_{tr}} \right) \sigma \quad (19)$$

성공적인 평균 전송시간은 P_s 와 한 스테이션이 충돌 없이 패킷을 전송했을 때 점유한 채널의 평균시간인 T_s 의 곱으로 표현된다.

평균 충돌시간은 적어도 하나의 스테이션이 패킷을 전송할 확률인 $1 - P_{tr}$ 과 패킷 전송시 충돌될 때 점유

된 채널의 평균시간인 T_c 의 곱으로 표현된다.

모든 패킷은 동일한 크기로 전송된다고 가정하면 $E[P] = P$ 이다. 그리고 T_s, T_c 는 매체접근방식에 따라 다음과 같이 표현된다^[23].

$$T_s^{basic} = H + P + SIFS + \delta + ACK + DIFS + \delta \quad (20)$$

$$T_c^{basic} = H + P + \delta + DIFS \quad (21)$$

$$T_s^{RTS/CTS} = RTS + SIFS + \delta + CTS + SIFS + H + P + SIFS + \delta + ACK + DIFS + \delta \quad (22)$$

$$T_c^{RTS/CTS} = RTS + DIFS + \delta \quad (23)$$

$H = PHY_{header} + MAC_{header}$ 를 의미하고, δ 는 전파지연시간을 의미한다.

본 논문에서 제시한 모델 검증에 위하여 참고문헌 [24]에서 제시한 모델과 네트워크 시뮬레이터인 OPNET을 이용하여 표 5와 같이 파라미터를 설정하고, $m=1, W=32, \text{Packet payload} = 8184 \text{ bits}$, 채널 bit rate = 1Mbps라 가정하고, $n=10, 15$ 일 때, 정규화된 throughput은 표 4와 같다.

표 4에서와 같이 시뮬레이터 결과값을 기준으로, 본 논문에서 제시한 모델이 기존 참고문헌의 모델보다 편차가 좀 더 작음을 알 수 있다. 하지만, n 이 증가할수록 편차 차이는 줄어들고, 시뮬레이션과의 편차는 늘어남

표 4. 모델 검증
Table 4. Model Validation.

	매체접근방식	Basic	RTS/CTS
n=10	시뮬레이터	0.687526	0.73212
	본 논문에서 제시한 모델	0.6882	0.7307
	편차	-0.098%	0.194%
	참고문헌 [24]의 모델	0.6898	0.7332
	편차	-0.154%	-0.343%
n=15	시뮬레이터	0.734195	0.66558
	본 논문에서 제시한 모델	0.6617	0.7357
	편차	-0.205%	0.583%
	참고문헌 [24]의 모델	0.6695	0.7358
	편차	-0.216%	-0.595%

표 5. Throughput 분석을 위한 파라미터 설정
Table 5. Parameter Setting for Throughput Analysis.

파라미터	값
Packet Payload	1000/4000/8184(Max)bits
MAC header	272 bits
PHY header	128 bits
ACK	112 bits + PHY header
RTS	160 bits + PHY header
CTS	112 bits
채널 bit rate	1/5.5/11Mbps
Slot time	220us
SIFS	28us
DIFS(SIFS+2 슬롯타임)	468us
전파지연시간	100us(@30km)

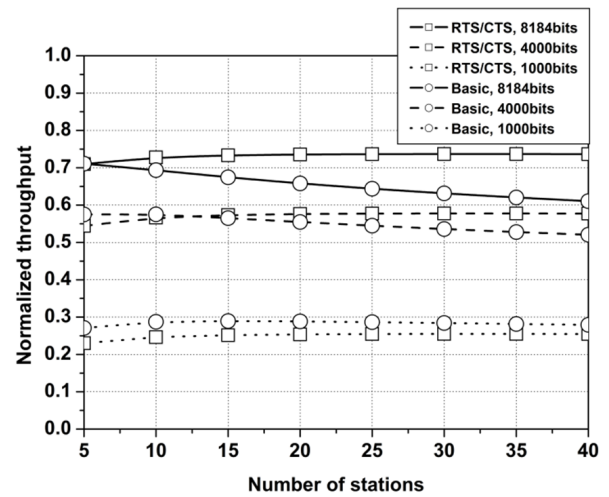


그림 6. 패킷 크기에 따른 정규화된 Throughput.
Fig. 6. Normalized Throughput depending on Packet Size.

을 알 수 있다.

본 논문에서 제시한 모델을 이용하여 원전비상통신 시스템 throughput 분석을 위하여 표 5와 같이 각 파라미터를 설정하였다.

그림 6은 패킷 크기에 따른 정규화된 Throughput을 나타내는 그림으로 채널 bit rate=1Mbps, $W=32, m=3$ 이라 가정하였다. 패킷 크기가 작은 경우 Basic 매체 접근방식이 RTS(Request to Send)/CTS(Clear to Send) 매체 접근방식 보다 Throughput이 더 높고, 패킷 크기가 큰 경우에는 RTS/CTS이 Basic보다 더 높음을 알 수 있다.

그림 7은 backoff 단계에 따른 정규화된 Throughput을 보여주는 그림으로, 채널 전송속도=1Mbps, 경쟁 윈도우 크기=32, 패킷 크기=8184bits라 가정하였다.

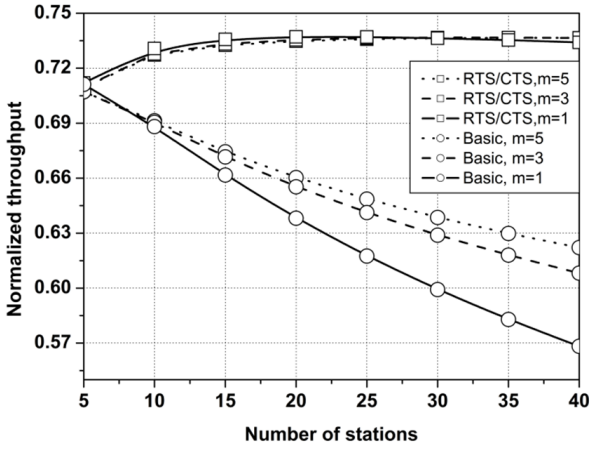


그림 7. backoff 단계에 따른 정규화된 Throughput.
Fig. 7. Normalized Throughput depending on Backoff Stage.

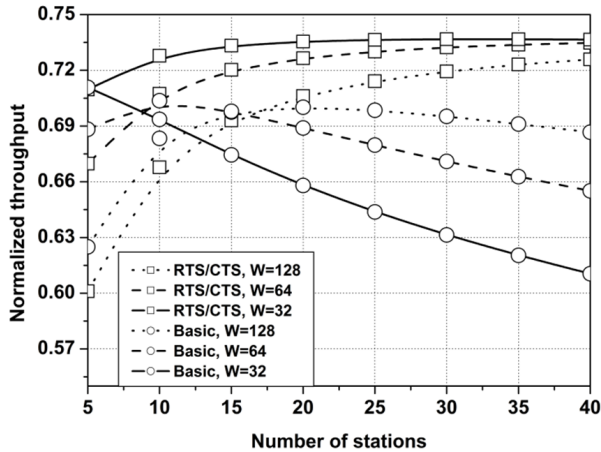


그림 8. 경쟁 윈도우 크기에 따른 정규화된 Throughput.
Fig. 8. Normalized Throughput depending on Contention Window Size.

RTS/CTS 매체 접근방식은 스테이션 개수에 상관없이 일정한 Throughput을 나타내고 있지만, Basic 매체 접근방식은 스테이션 개수가 증가함에 따라 Throughput은 감소한다.

그림 8은 다양한 경쟁 윈도우 크기에 따른 정규화된 Throughput을 보여주는 그림으로, 채널 전송 속도 =1Mbps, m=3, 패킷 크기=8184bits라 가정하였다. 모든 경쟁윈도우 크기에 대하여 RTS/CTS 매체 접근 방식의 Throughput이 Basic 매체 접근 방식보다 크다. RTS/CTS 매체 접근 방식의 경우, 경쟁윈도우 크기가 증가함에 따라 Throughput은 감소하지만, 스테이션의 개수가 증가함에 따라 증가한다. 반면에 Basic 매체 접근 방식은 경쟁 윈도우 크기가 증가함에 따라

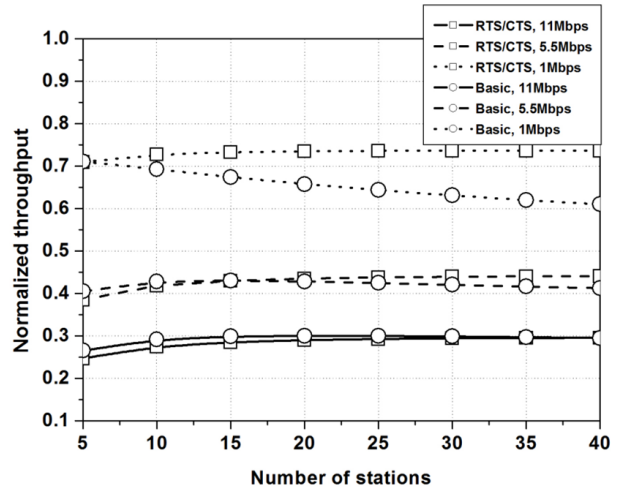


그림 9. 채널 bit rate에 따른 정규화된 Throughput.
Fig. 9. Normalized Throughput depending on Channel Bit Rate.

Throughput은 증가하고, 스테이션의 개수가 증가함에 따라 Throughput은 감소한다.

그림 9는 다양한 채널 전송 속도에 따른 정규화된 Throughput으로 W=32, m=3, 패킷크기=8184bit이라 가정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 채널 전송 속도가 증가함에 따라 Throughput은 감소한다.

원전비상통신망의 경우 스테이션의 개수가 12개이고, 12개의 스테이션들의 총 데이터 전송량은 1Mbps이므로, 1개 스테이션의 데이터 전송량은 0.083Mbps이다. 이 전송량은 어떠한 매체접근방식을 사용해도 요건을 만족시킬 수 있지만, 추후 감시 데이터의 추가 및 발전소 내부 상황을 실시간 모니터링 할 수 있는 영상 데이터 전송 가능성으로 인해 더 많은 Throughput이 요구될 수 있다. 따라서 대용량에 유리하고, 파라미터 변화에 비교적 영향을 덜 받는 RTS/CTS 매체접근방식을 사용해야 한다.

다. 지연시간 분석

일반적으로 지연시간은 패킷 전송 시, 수신자가 성공적으로 수신했을 때의 시간간격으로 정의된다. 지연시간을 분석하기 위하여 D 를 패킷 지연 시간시간을 나타내는 랜덤변수라 하고, $E[D]$ 를 평균 지연시간이라 한다면, $E[D]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$E[D] = E[N_c](E[BD] + T_c + T_w) + E[BD] + T_s \tag{24}$$

식(24)에서 첫 번째 항은 충돌이 발생했을 때의 지연 시간을 의미하고 두 번째 항은 backoff 과정에서의 지연 시간을 의미한다. 첫 번째 항의 $E[N_c]$ 는 성공적인 패킷 전송이 될 때까지의 평균 충돌 횟수를 의미하고 $E[BD]$ 는 평균 backoff 지연 시간, T_w 는 패킷 충돌 시 스테이션이 대기하는 시간을 의미한다. $E[N_c]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$E[N_c] = (1 - P_s) + (1 - P_s)^2 + \dots$$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n (1 - P_s)^k = \left(\frac{1 - P_s}{P_s} \right) \quad (25)$$

$E[BD]$ 를 구하기 위해서는 유휴 채널 및 무휴 채널에 대하여 backoff 지연시간을 각각 고려해야한다. 유휴 채널의 경우, backoff time counter가 $b_{i,k}$ 상태에 존재한다면 backoff time counter가 $b_{i,0}$ 상태에 도달하기 위해서 k 개의 슬롯타임이 필요하다. 그리고 채널이 유휴상태라고 가정하였기 때문에 $E[BD_{idle}]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$E[BD_{idle}] = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} kb_{i,k} \quad (26)$$

식 (7) ~ (10)을 이용하면 $E[BD_{idle}]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$E[BD_{idle}] = b_{0,0} \left[\frac{W^2(1 - (4P_c)^m(1 - P_c))}{6(1 - P_b)(1 - 4P_c)(1 - P_c)} - \frac{(1 - P_c^m)(1 - 4P_c)}{6(1 - P_b)(1 - 4P_c)(1 - P_c)} + \frac{W^2((4P_c)^m - P_c^m)(1 - 4P_c)}{6(1 - P_b)(1 - 4P_c)(1 - P_c)} \right] \quad (27)$$

채널이 무휴상태인 경우, $E[Idle]$ 를 backoff time counter가 0에 도달하기 전 평균 idle 슬롯 개수라고 한다면 다음과 같이 표현된다.

$$E[Idle] = (1 - P_{tr}) + (1 - P_{tr})^2 + \dots$$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n (1 - P_{tr})^k = \left(\frac{1 - P_{tr}}{P_{tr}} \right) \quad (28)$$

$E[N_{FR}]$ 을 다른 스테이션의 패킷 전송을 감지한 평균 횟수 즉, backoff time counter가 정지되는 평균 회수라고 한다면 다음과 같이 표현된다.

$$E[N_{FR}] = (E[BD_{idle}] - E[Idle])(P_{tr} + P_{tr}^2 + \dots)$$

$$= (E[BD_{idle}] - E[Idle]) \left(\frac{P_{tr}}{1 - P_{tr}} \right) \quad (29)$$

마지막으로 $E[BD_{busy}]$ 를 채널이 무휴상태일 때, 평균 backoff 지연시간이라고 한다면 다음과 같이 표현된다.

$$E[BD_{busy}] = E[N_{FR}](P_s T_s + (1 - P_s) T_c) \quad (30)$$

식 (28)~(29)로부터 $E[BD]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$E[BD] = E[BD_{idle}] + E[BD_{busy}]$$

$$= E[BD_{idle}] + E[N_{FR}](P_s T_s + (1 - P_s) T_c) \quad (31)$$

식 (24)의 T_w 는 매체접근방식에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$T_w = \left(\frac{SIFS + ACK_Timeout}{SIFS + CTS_Timeout} \right) \quad (32)$$

$ACK_Timeout$ 과 $CTS_Timeout$ 은 다음과 같다^[26].

$$ACK_Timeout = \delta + SIFS + ACK + \delta$$

$$CTS_Timeout = \delta + SIFS + CTS + \delta \quad (33)$$

δ :전파지연시간

그림 10은 backoff 단계에 따른 평균지연시간을 보여주는 그림으로 패킷 크기는 8184bits, 경쟁 윈도우 크기는 32, channel bit rate는 1Mbps라 가정하였다.

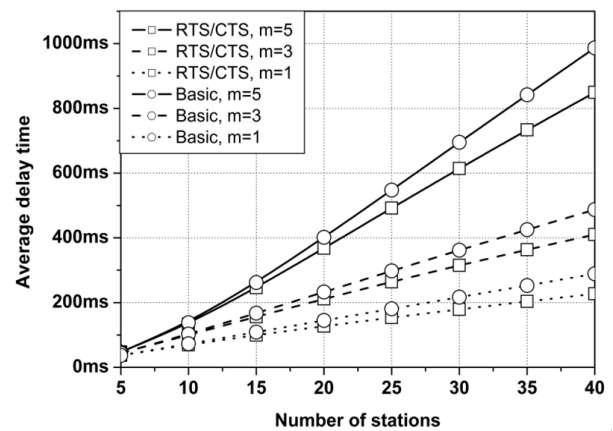


그림 10. Backoff 단계에 따른 평균지연시간
Fig. 10. Average Delay Time depending on Backoff Stage.

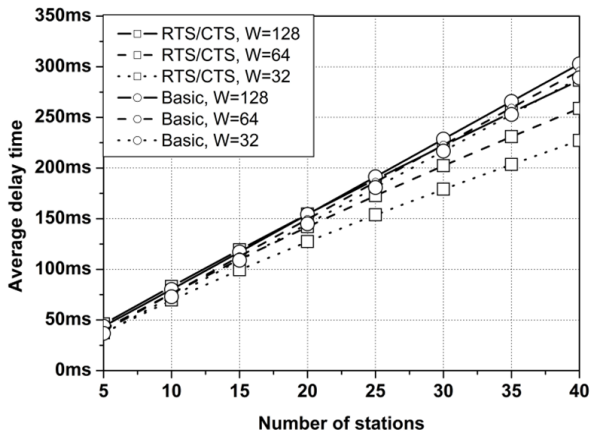


그림 11. 경쟁 윈도우 크기에 따른 평균지연시간
Fig. 11. Average Delay Time depending on Contention Window Size.

RTS/CTS 매체접근방식이 Basic 매체접근방식보다 지연시간이 작음을 알 수 있다. 스테이션의 개수가 12개 일 때 평균지연시간은 대략 80ms이다.

그림 11은 경쟁 윈도우 크기에 따른 평균지연시간을 나타내는 그림으로 패킷 크기는 8184bits, backoff 단계는 1, channel bit rate는 1Mbps라 가정하였다. 그림 10과 마찬가지로 RTS/CTS 매체접근방식이 Basic 매체접근방식보다 지연시간이 작다. 지연시간의 상대적 크기 변화는 backoff 단계보다 경쟁 윈도우 크기 변화에 덜 영향을 받는다.

IV. 결 론

본 논문에서는 후쿠시마 원전 사고와 같은 중대사고 발생 시, 극한환경제어기기 및 모바일 원격 제어실을 이용하여 발전소 내부 상황을 감시 및 제어할 수 있는 비상대응시스템에 대하여 소개하고, 비상대응시스템에 사용되는 무선통신의 성능요구사항을 분석하고, 성능요구사항을 만족시킬 수 있는 비상통신시스템의 성능을 평가하였다. 분석된 비상통신시스템의 성능요구사항으로서, Throughput은 1Mbps, 지연시간은 0.1 ~ 1s, 비트오류율은 10^{-6} 이하가 요구되는 것으로 분석되었다. 모바일 원격 제어실과 발전소의 LOS(Line of Sight)가 확보된다면, 송신전력이 23dBm, 안테나 이득이 각각 20dBi, 6dBi 라 가정하면, Fade margin은 3dB, 비트 오류율 10^{-6} 을 만족시키기 위한 S/N은 약 7dB 정도의 여유를 확보할 수 있다.

또한 마코프 모델을 이용하여 802.11을 사용하는 비상대응시스템의 Throughput 및 지연시간을 분석하였다. 분석결과, 각 발전소는 최소 1Mbps 이상의 채널 전송 속도를 사용하고, 추후 데이터 용량 여유도를 고려한다면, 대용량에 유리하고, 802.11의 파라미터들에 영향을 덜 받는 RTS/CTS 매체접근방식을 이용해야 한다. 그리고 12 발전소의 채널 전송 속도를 1Mbps라 가정하면 평균지연시간은 대략 80ms로 지연시간 요구조건을 만족시킬 수 있다.

본 논문에서는 발전소들과 모바일 원격 제어실과 LOS가 확보되고, 모바일 원격 제어실은 초기 기동시에 서만 움직이고, 운영시에는 고정된다고 가정하였기 때문에, 실제 비상통신시스템 개발 시에는 주변 지형 조건에 따른 전파환경모델과 모바일 환경에서의 잡음 모델들이 고려되어야 하고, 추후 발전소의 내부 상황을 감시할 수 있는 영상 데이터까지 전송한다면 보다 높은 데이터 전송률이 요구되고, 이에 따라 비트오류율, 10^{-6} 을 만족시키기 위해 더 높은 S/N이 요구되기 때문에, 발전소들과 모바일 원격 제어실 사이에 중계기를 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] The official report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, *The National Diet of Japan*, 2012.
- [2] Fukushima Nuclear Accident Analysis Report, Tokyo Electric Power Company, Inc., June 20, 2012.
- [3] IAEA Mission Report, "The Great East Japan Earthquake Expert Mission/IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami", May 24-June 2, 2011.
- [4] Electric Power Research Institute (EPRI), Fukushima Daiichi Accident/Technical Causal Factor Analysis, No. 1024946, March 2012.
- [5] NUREG-0696, Functional Criteria for Emergency Response Facilities, U.S. Nuclear Regulatory Commission Washington, D.C., 1981.
- [6] The 6th Basic Plan of the Power Supply and Demand, Ministry of Knowledge Economy Public Announcement in Korea, 2013-63(2013.02.25.)
- [7] Seop Hur, "Analysis of Severe Accident

- Parameters, Technical Report“, Korea Atomic Energy Research Institute, 2013.05.
- [8] Kwang Seop Son, “Design Requirement of Nuclear Integrated Safety System“, Design Report, Korea Atomic Energy Research Institute, 2011.10.
- [9] Fan Yang, Qian Zhang, Wenwu Zhu, Ya-Qin Zhang, “An Efficient Transport Scheme for Multimedia over Wireless Internet“, *Proc. Int. Conf. Third Generation Wireless and Beyond*, 2011.
- [10] Richard Zurawski, “Industrial Communication Technology“, *Taylor&Francis Publishing Company*
- [11] IEEE Standard for Part 15.4 : Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specification for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANS), 2003.
- [12] IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirement, 2007.
- [13] Korea Communication Commission Notice, 2010-1, The Regulation of Wireless equipment
- [14] Cisco Aironet 1400 Series Wireless Bridge Data Sheet
- [15] WLAN 802.11 RX Sensitivity, Agilent Technology White paper
- [16] J. Trachewsky, A. Rofougaran, A. Behzad, T. Robinson, E. Frank, “Broadcom WLAN Chipset for 802.11 a/b/g“, Broadcom Corporation, 2003.
- [17] Texas Instruments WL1271-TiWi-BLE, Data Sheet
- [18] Texas Instruments CC2590, Data Sheet
- [19] IEEE P802.11-94/132, Wireless Access Methods and Physical Layer Specifications : Elaborate Clear-Channel Assessment for Indoor Communication Systems Operating in Uncontrolled UHF & Microwave Bands, July 1994.
- [20] Bernard Sklar, “Digital Communications Fundamentals and Application“, Second Edition, Prentice Hall, 2001.
- [21] S. S. Han, S. B. Lee, K. S. Han, “Analysis of IEEE 802.11 Wireless LAN for Industrial Network“, 2011 IEIE Summer Symposium
- [22] H.S. Chhaya, S. Gupta, “Performance Modeling of Asynchronous Data Transfers of IEEE 802.11 MAC protocol“, *Wireless Network* 3, p217 ~ 234, 1997.
- [23] G. Bianchi, L. Fratta, M. Oliveri, “Performance Evaluation and Enhancement of the CSMA/CA MAC Protocol for 802.11 Wireless LANs“, *Personal, Indoor and Mobile Radio Communication, 1996, PIMRC'96, 7th IEEE International Symposium*
- [24] G. Bianchi, “Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function“, Vol 18, No 3, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000.
- [25] P. Chatzimisios, V. Vitas, A. C. Boucouvalas, “Throughput and delay analysis of IEEE 802.11 protocol“, *Networked Appliances, 2002. Liverpool. Proceeding, 2002 IEEE International Workshop*
- [26] (2013)[Online]. Available: <http://www.air-stream.org/technical/ack-timeout-and-effects-distance-links>

— 저 자 소 개 —



손 광 섭(정희원)

2004년 충남대학교 전기전자전파 공학과 학사 졸업.

2006년 KAIST 전기전자공과 석사 졸업

2006년~2007년 LG 전자 기술원 주임 연구원

2008년~현재: 한국원자력연구원 계측제어인간공학 연구부 선임 연구원

<주관심분야 : 원전안전계통, 원전안전통신망>